

TURBULENCIA GENERADA POR UNA CORRIENTE DE GRAVEDAD

L. P. Thomas* B. M. Marino* and S. B. Dalziel⁺

* Instituto de Física Arroyo Seco, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro. Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina. Investigador del CONICET.

⁺Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, Silver Street, Cambridge CB3 9EW, Inglaterra.

e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Estudiamos las características de las fluctuaciones del campo de velocidad en la parte delantera o cabeza de corrientes de gravedad inerciales generadas en un canal de sección rectangular. Las corrientes estudiadas tienen lugar tanto sobre la superficie horizontal del fondo del canal como inmediatamente debajo de la superficie de separación entre el fluido ambiente y el aire. El campo de velocidad es medido por medio de la trayectoria de partículas (PTV) agregadas al fluido de la corriente y al fluido ambiente, las cuales son iluminadas con una hoja de luz vertical que contiene la dirección de propagación. De este campo obtenemos las características de las fluctuaciones del campo bidimensional de velocidades en el interior y alrededor de la cabeza para distintos números de Reynolds, en particular las distribuciones de la magnitud de las fluctuaciones y del esfuerzo de Reynolds, promediadas durante un cierto tiempo en el marco de referencia que se mueve con la corriente. Los resultados obtenidos permiten obtener una buena descripción de la estructura turbulenta del flujo.

We study the main features of the fluctuations of the velocity field inside the head of inertial plane gravity currents generated in a rectangular cross section channel. The currents develop over a horizontal solid bottom or along the liquid free surface. The velocity field is measured by particle tracking velocimetry (PTV) along a plane containing the direction of spreading. We obtain the features of the 2D fluctuations in the velocity field inside and around the leading head of the current for different Reynolds numbers. In particular we report the time-averaged magnitude distributions of the square velocity fluctuations and Reynolds stress in the frame of reference moving with the head, which describe a turbulent structure of the flow.

I. INTRODUCCIÓN

Las corrientes generadas por la acción de la gravedad en dos fluidos de diferente densidad se encuentran en una amplia gama de situaciones naturales e industriales¹. La diferencia de densidad entre los fluidos de la corriente y del ambiente se debe a la presencia de material disuelto o suspendido. En particular, tanto en ríos como en la atmósfera, son comunes las corrientes de turbidez en la que los sedimentos se mantienen en suspensión por la turbulencia del flujo, y proporcionan la diferencia de densidad promedio mencionada. La turbulencia del flujo además puede extraer sedimentos desde el fondo en algunos casos, lo cual modifica la dinámica de estas corrientes.

Aun cuando estos flujos son tridimensionales, las predicciones analíticas y numéricas emplean aproximaciones bidimensionales²⁻⁵. Las inestabilidades tridimensionales y sus consecuencias se consideran por medio de parámetros empíricos promedio o se desprecian directamente. Härtel *et al.*⁶ realizaron simulaciones tridimensionales a números de Reynolds moderados y confirmaron que las cantidades integradas sobre el ancho del flujo concuerdan con los resultados de las simulaciones bidimensionales y las observaciones experimentales. Los estudios experimentales también

utilizan vistas bidimensionales de las corrientes, por medio de visualizaciones de cantidades integradas sobre el ancho de los canales.

El flujo en la cabeza de corriente mantiene un suministro promedio continuo de fluido sin diluir desde la parte trasera o cola de la corriente hacia el frente. Si la cabeza viaja a una velocidad constante, el flujo medio debe balancear la pérdida de fluido mezclado en el ambiente que queda en la estela. Cuando la corriente se mueve sobre un contorno firme, este contorno retiene fluido en una capa límite que también debe reponerse por el flujo interior de la corriente. Por otra parte, para números de Reynolds grandes el flujo es turbulento y entonces la velocidad tiene una componente fluctuante que eventualmente puede llegar a ocultar el flujo medio en las mediciones experimentales. La turbulencia implica un gasto adicional de energía que se obtiene del flujo medio, retardando la propagación de la corriente, y juega un papel importante cuando hay partículas en suspensión, como se mencionara más arriba.

A pesar de la importancia de este flujo, el trabajo experimental se ha concentrado en otros aspectos de las corrientes de gravedad. Linden y Simpson⁷ y Parsons y García⁸ examinaron algunos efectos de la turbulencia ambiente sobre la corriente. Por otra parte, Kneller *et al.*⁹ reportaron algunas mediciones del campo de velocidad de corrientes turbulentas por medio de

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

anemometría láser. Las corrientes se generaron en un canal rectangular en la forma estándar, i. e. liberando agua salada en un canal rectangular contenida inicialmente en un dique. En este caso, las mediciones puntuales de la velocidad instantánea provenientes de diferentes experimentos permitieron determinar la estructura del campo de velocidad de una corriente de gravedad para $Re \approx 4000$ moviéndose sobre un contorno rígido. El valor de la velocidad medido en cada punto se dividió en un valor medio, promediando los datos durante 0.1 s, y la correspondiente parte fluctuante. El perfil de velocidad 2D promedio en la cola de la corriente en la fase inicial se construyó con un total de 15 puntos por encima del piso localizados sobre una línea vertical distante a 2.35 longitudes del dique desde la pared trasera del tanque. Este perfil promedio se comparó satisfactoriamente con resultados previos y con un modelo teórico, donde se lo considera como la superposición de dos perfiles de velocidad provenientes de las capas límites superior e inferior. En un cálculo posterior, y gracias a la hipótesis de flujo estacionario, la evolución temporal de la velocidad en los 15 puntos fijos mencionados permitió asignar los valores de la velocidad en puntos distribuidos espacialmente en el marco de referencia que se mueve con la corriente, desplazando la ubicación de los puntos de medición por medio de la velocidad del frente. Así se generó la estructura bidimensional de velocidad de la cabeza de la corriente estudiada, de la cual los autores reportan un mapa de vectores, una distribución en escala de grises para la magnitud de la velocidad, las magnitudes de las fluctuaciones cuadráticas medias y el esfuerzo de Reynolds. De este estudio Kneller *et al.*⁹ concluyeron que aparentemente no hay un flujo neto desde el centro de la corriente hacia el contorno inferior, y el patrón general de la circulación de fluido dentro de la corriente es similar al que correspondería a una corriente avanzando sobre un contorno sin fricción.

En un trabajo anterior¹⁰ presentamos las características bidimensionales promedio del campo de velocidad dentro y alrededor de la cabeza de la corriente en el marco de referencia que se mueve con la corriente. Entonces mostramos la circulación desde el centro de la corriente hacia el contorno rígido, de acuerdo con trabajos previos¹ y en contraste con lo sugerido por Kneller *et al.*⁹ Agregamos ahora el estudio de las fluctuaciones de esos flujos, pues creemos que es de interés para entender la dinámica de las corrientes turbulentas.

La disposición experimental está descrita en detalle en la Ref. 10 y 11, de modo que aquí presentaremos un resumen a fin de evitar repeticiones. Realizamos la medición de las dos componentes principales de la velocidad por medio de la trayectoria de partículas agregadas al fluido de la corriente y al fluido ambiente (*particle tracking velocimetry* PTV). Las partículas trazadoras tienen aproximadamente igual densidad que el fluido, y por ende siguen el flujo. Las mismas se iluminan con una delgada hoja de luz vertical en la

dirección de la corriente. La cámara determina una ventana por la cual pasa la corriente; la posición y tamaño de la ventana se mantienen fijos en toda la evolución. Determinamos las trayectorias de la mayoría de las partículas en el sistema de referencia que se mueve con el frente. Con posterioridad calculamos la velocidad promedio temporal, lo cual es más simple de realizar que un ensamble de los resultados de varios experimentos^{9,12}, o promediando sobre un ancho importante del canal. Además, realizamos el promedio durante un extenso período (12 s para $Re \approx 4000$), y los datos son consistentes puesto que extraemos toda la información del mismo experimento. La diferencia entre los valores instantáneo y promedio de la velocidad nos proporciona las fluctuaciones instantáneas, de las cuales el valor cuadrático medio y el esfuerzo de Reynolds en el plano analizado proveen información de la turbulencia en la ventana analizada. En este trabajo calculamos una sola componente del tensor de los esfuerzos de Reynolds, que surge de la correlación de las componentes horizontales y verticales de la fluctuación de la velocidad en cada punto. A pesar de que la turbulencia es tridimensional, la información bidimensional que obtenemos proporciona una útil descripción de la estructura turbulenta del flujo. Este es el enfoque usual en el análisis de capas límites turbulentas, chorros y estelas generados en contornos bidimensionales.

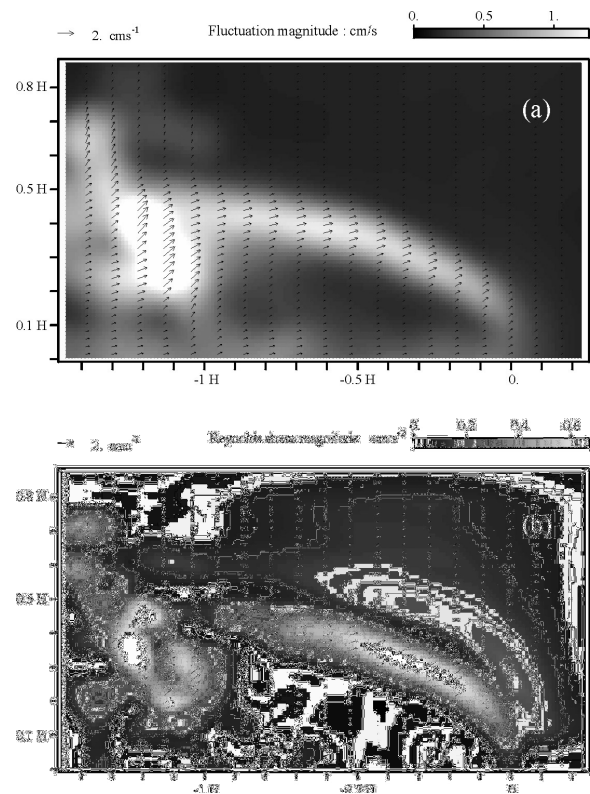


Fig. 1: (a) Fluctuaciones cuadráticas medias de la velocidad y (b) esfuerzo de Reynolds para una corriente de gravedad sobre un piso sólido para $Re \sim 1200$

$$(\mathbf{Dr} = 0.07\%, U = 1.54 \text{ cm/s}).$$

II. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Fig. 1a mostramos las fluctuaciones cuadráticas medias (vectores) como así también su magnitud en escala de grises obtenidas para una corriente de gravedad avanzando sobre el fondo rígido del canal para $Re \approx 1200$. La magnitud de la fluctuación de la velocidad está relacionada a la energía cinética por unidad de volumen asociada a la turbulencia. Vemos que los valores máximos de magnitud ocurren en los vórtices localizados en la parte posterior de la cabeza, y en la banda superior entre el fluido ambiente y el de la corriente, en concordancia con los campos de vorticidad y esfuerzo de corte mostrados en nuestro trabajo previo¹⁰. Hay también algunas fluctuaciones de velocidad en la capa límite inferior adyacente al fondo del canal, pero con una magnitud mucho menor. Dentro de la corriente, una región central de pequeñas fluctuaciones sugiere que el flujo interno hacia el frente de la corriente es una región externa a dos capas límites turbulentas: una inferior y otra superior, como fuera indicado por Kneller *et al.*⁹ para el flujo en la cola de la corriente.

Las fluctuaciones de velocidad producen un esfuerzo sobre el flujo medio análogo al debido a la viscosidad. En particular, las regiones con altos valores del esfuerzo de Reynolds indican las zonas donde la energía cinética de la turbulencia surge a costa de una desaceleración del flujo medio. La representación en escala de grises mostrada en la Fig. 1b muestra los valores promedios del esfuerzo de Reynolds. Nótese que el esfuerzo es importante en los vórtices de la parte trasera de la cabeza, y también en la banda superior. Esta banda tiene una región frontal más corta que la banda con fluctuaciones de mayor intensidad mostrada en la Fig. 1a, sugiriendo que parte del fluido turbulento se produce en la parte delantera y se transporta corriente abajo en la estela de la corriente.

Para números de Reynolds mayores, la estructura de las fluctuaciones muestra características análogas a la Fig. 1, aunque la región dominante frontal se mueve hacia el punto de contacto de la corriente con el contorno. Por el contrario, cambios importantes en la estructura ocurren para números de Reynolds menores, como puede verse en la Fig. 2a para $Re \approx 120$. La banda inferior de altas fluctuaciones está concentrada en el borde delantero de la corriente y tiene magnitud similar que la banda superior. Las fluctuaciones en el fluido ambiente permanecen casi constantes en todas partes, como en la Fig. 1a. El campo del esfuerzo de Reynolds (Fig. 2b) indica que la región con altos valores de esfuerzo está localizado en el borde delantero y en los vórtices. De acuerdo a los resultados presentados en las Fig. 1 y 2, se deduce que el esfuerzo de Reynolds es significativo en diferentes partes de acuerdo al Re , y probablemente tiene influencia en los ligeros cambios de la forma que adopta la parte delantera de la corriente para diferentes números de Reynolds.

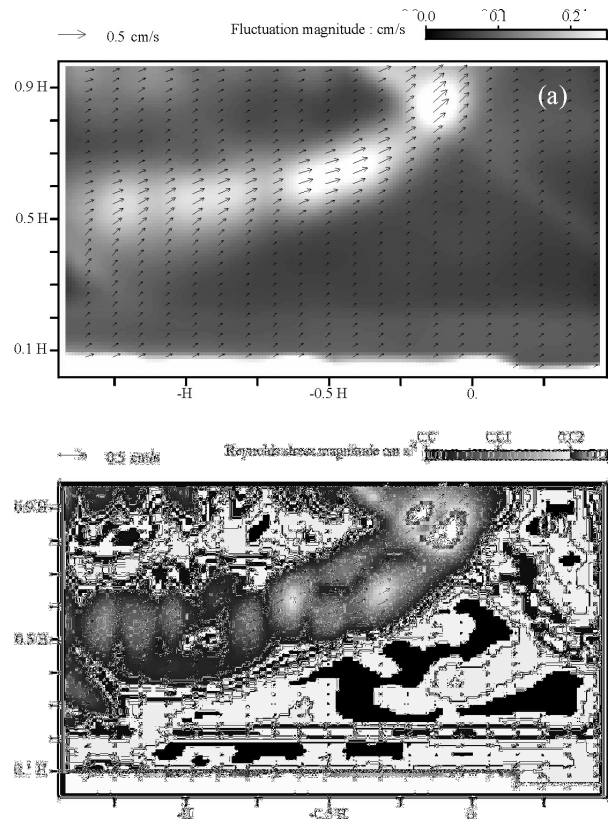


Fig. 3: (a) Fluctuaciones cuadráticas medias de la velocidad y (b) esfuerzo de Reynolds para una corriente de gravedad superficial con $Re \sim 1300$.

Las corrientes que se desplazan debajo de una superficie libre para $Re \gg 1300$ muestran un patrón de fluctuación similar (Fig. 3). Sin embargo, la magnitud de las fluctuaciones es reducida significativamente (un factor cinco), respecto de aquella mostrada en la Fig. 1 cuando la corriente avanza sobre el fondo rígido del canal. La reducción alcanza un factor 30 para la magnitud del esfuerzo de Reynolds entre los flujos con las dos condiciones de contorno analizadas. Además notamos dos cambios adicionales en la banda superior, relacionados con la ubicación de las zonas de alto valor del esfuerzo y con la dirección de las fluctuaciones. Para números de Reynolds mayores (ver Fig. 4 para el caso $Re \approx 3800$), la banda de fluctuaciones es más cercana a la superficie respecto de la encontrada para corrientes que fluyen sobre un piso rígido. El esfuerzo de Reynolds y las magnitudes de las fluctuaciones, por otra parte, son comparables a los correspondientes a corrientes con una condición de contorno de no-deslizamiento. El conjunto de los resultados, entonces, sugiere que la condición de contorno genera relativamente menor turbulencia cuando se incrementa el número de Reynolds. Esta dependencia es consistente con la dependencia del número de Froude en el frente en función de Re , que tiende a ser similar para altos números de Reynolds en diferentes condiciones de contorno.

Las distribuciones encontradas para las corrientes sobre piso sólido son algo diferentes que las

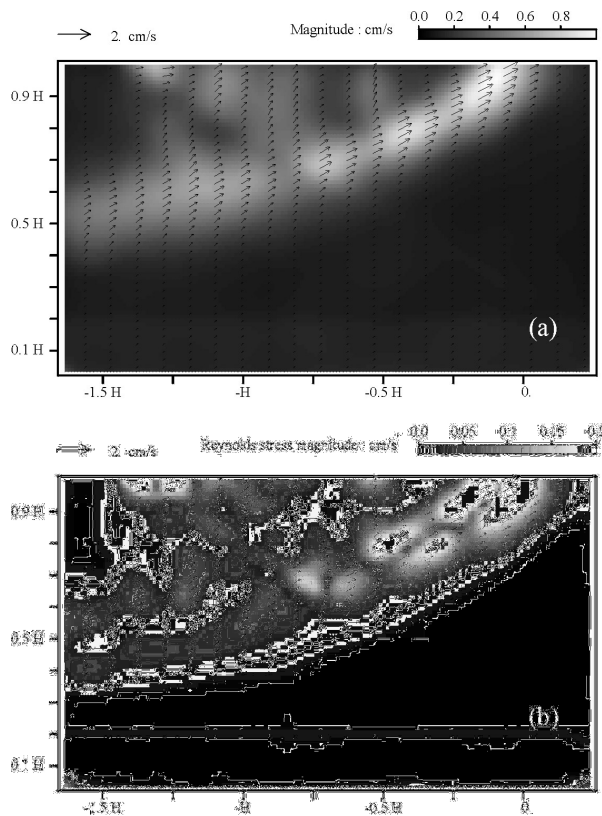


Fig. 4: (a) Fluctuaciones cuadráticas medias de la velocidad y (b) esfuerzo de Reynolds para una corriente de gravedad superficial con $Re \sim 3800$.

encontradas por Kneller *et al.*⁹, pero resultan consistentes con el resto de la información presentada anteriormente¹⁰ para el campo de velocidad medio, como así también con la bibliografía relacionada^{1,13,14}. La explicación más razonable parece ser que el ensamble de los campos de velocidades puntuales instantáneos provenientes de diferentes experimentos como los medidos por Kneller *et al.*⁹ conducen a un campo de fluctuaciones erróneo, aun si los experimentos fueron realizados con las mismas condiciones iniciales, debido a las características turbulentas del flujo.

III. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo estudiamos la estructura de las fluctuaciones en la parte delantera de corrientes de gravedad inerciales planas. Los resultados corresponden a una proyección bidimensional, ya que las fluctuaciones y esfuerzos de Reynolds del flujo son calculados con las componentes verticales y

horizontales de la velocidad del fluido. No obstante, los mismos aportan información interesante para entender el flujo dentro de la corriente y su cambio con el número de Reynolds del flujo, y para la elaboración de modelos analíticos.

En particular mostramos que la energía de la turbulencia se genera en una región frontal entre el fluido ambiente y la corriente para $Re \gtrsim 1000$. La estela posterior está compuesta por el fluido con fuertes fluctuaciones que es llevado corriente abajo desde la región frontal. La magnitud del esfuerzo de Reynolds nos indica la forma en que la turbulencia reduce la velocidad del frente de la corriente, y el número de Froude correspondiente, para altos números Re . La comparación entre las corrientes que se propagan con diferentes condiciones de contorno (piso rígido y superficie libre) completa el esquema.

Referencias

- 1 - Simpson J.E. "Gravity currents: In the environment and the laboratory". 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1997).
- 2 - Brighton, P.M.W. J. Fluid Mech. **198**, 75-96 (1988).
- 3 - Grundy, R. E. and Rottman, J. W. J. Fluid Mech. **156**, 39-53 (1985).
- 4 - Gratton J. and C. Vigo. J. Fluid Mech. **258**, 77-104 (1994).
- 5 - Klemp J.B., R. Rotunno and W.C. Skamarock. J. Fluid Mech. **269**, 169-198 (1994).
- 6 - Härtel C., E. Meiburg and F. Necker. J. Fluid Mech **418**, 189-212 (2000).
- 7 - Linden, P.F. and Simpson, J.E. J. Fluid Mech. **172**, 481-497 (1996).
- 8 - Parsons J.D. and M.H. Garcia. Phys. Fluids **10**, 3209-3213 (1998).
- 9 - Kneller, B. C., Bennett, S. J. and McCaffrey, W. D. J Geophys. Res. **104**, 5381-5391 (1999).
- 10- Thomas, L. P. and Dalziel, S. B. ANALES AFA **11**, 69-74 (2000).
- 11-Thomas, L. P., Dalziel, S. B. and Marino, B. M. Submitted to *Exp. in Fluids*.
- 12-Alahyari, A. & Longmire, E.K. *Exp. in Fluids* **20**, 410-416 (1996).
- 13- Simpson J.E. and R.E. Britter. J. Fluid Mech. **94**, 477-495 (1979).
- 14-Britter, R.E. and J.E. Simpson. J. Fluid Mech. **88**, 223-240 (1978).